基于 SiPM 的便携式 NaI(TI)探测器设计

冯朋磊[1]，卢位[1]，邹科峰[1]，李浩炫[1]，陈俊樵[1]，

陈韧[1]，杨月[1]，周英杰[1]，王磊[1,2*]

（1 成都理工大学，四川 成都 610059，

2 四川轻化工大学，四川 宜宾 644000）

摘 要：NaI(Tl)晶体是一种常见的辐射探测器材料，由于其与射线相互作用产生的是微弱光信号，因此需要使用光电倍增管将光信号转换为电信号供后级电路处理。硅光电倍增管作为一种新型光电转换器件，相较于传统的光电倍增管具有低噪声、体积小、低功耗、和抗磁性等优点。因此，采用 SiPM 设计的 NaI(Tl)闪烁体探测器，具有体积小、高效、灵敏和抗干扰强的优点，通过优化探测器的物理结构和信号处理电路，实现了对伽马射线的高效探测。本文设计研发了采用 SiPM 的 1 英寸的 NaI(Tl)探测器，具有体积小，本底噪声低的优点。测试了探测器对 ^{137}Cs 源的能谱影响，结果表明探测器对 0.662MeV 的 γ 射线能量分辨率为 8.72%。

关键词：NaI(TI)晶体；SiPM；伽马射线；高能量分辨率；

中图分类号：TL812　　　**文献标志码**：A　　　doi：

项目基金:国家自然科学基金（41874121）

作者简介:冯朋磊（1999-），男，河南平顶山市人，硕士研究生，主要从事核仪器研究工作，主要研究 FPGA 程序设计与嵌入式程序设计。

通信作者:王磊（1981-），男，四川成都市人，教授，博导，主要从事核探测器设计及仪器仪表研究工作。

0 引言

γ射线测量技术在环境污染监测[1,4]、矿源寻找[2,4]、核事故应急[3,4]和医学等领域具有重要应用价值。近年来，随着核技术的不断进步和发展，高精度γ射线探测器在核科学研究和核工业领域中得到了广泛应用[4]。在放射性探测中，由于γ射线的穿透性强，NaI(Tl)闪烁体探测器因其闪烁效率高、较高的能量分辨率和能谱测量范围广而成为γ射线测量分析的重要工具[5]。传统的NaI(Tl)探测器一般由NaI(Tl)闪烁晶体，光电倍增管(Photo-multiplier tube，PMT)和前置放大器（Pre-amplifier，PA）组成[5]，由于这类探测器通常体积较大，且依赖于光电子倍增需求的真空环境，同时其机械性能和抗撞击能力较差，限制了它们在野外，医疗诊断和辐射监测等应用中的灵活性。光电倍增管一直是NaI(Tl)探测器的标配光电传感器，但它们对高压电源（几百伏到几千伏不等）的需求、尺寸较大和易受强磁场干扰等问题限制了便携性和实际应用范围。基于这些问题，近年来，基于硅光电倍增极管(Silicon photo-multiplier，SiPM）的NaI(Tl)探测器引起了广泛的研究兴趣。SiPM作为一种新型的半导体光电转换器件，因其具有低噪声[6]、快速时间响应[6]、偏置电压低[6]，体积小以及对磁场不敏感[6]等优点而被广泛应用用于新型的NaI探测器设计中。本文拟采用蒙特卡洛模拟技术将重点讨论基于SiPM的小型NaI(Tl)探测器的设计和研究方法，包括设计NaI(Tl)探测器的结构尺寸、性能参数、制作方法以及在核物理领域中的应用场景。该研究有望改善核辐射监测、医学诊断和核物理研究等领域的性能，为人类健康和环境保护提供更可靠的工具和方法。因此，深入研究和优化这一技术是当前放射性核素测量领域的重要任务。

1 探测器设计

1.1 选型与模拟设计

1.1.1 晶体选型

闪烁体探测器的探测原理是入射的射线粒子（例如γ）进入闪烁体中，经过光电效应、康普顿散射、电子—空穴对的形成等相互作用，闪烁体发出光子，但由于这些光子微弱无法直接被探测到，因此需采用光电倍增管的光阴极将其转换为电子后进行倍增放大，以便电子学仪器采集[7]。因此，发光效率、发光波长、发光衰减时间等参数是晶体选型的重要指标[7]。

表1 常见伽马射线探测晶体性能表

材料	发射谱极大值波长/nm	发光衰减时间常数/μs	λ_m 折射率	密度/(g/cm^3)	相对光输出/%

NaI(Tl)	420	0.23	1.85	3.67	100
CsI(Tl)	565	0.68(64%)	1.79	4.51	45
LaBr3(Ce)	380	0.016	1.9	5.2	165

如表 1 所示，LaBr3(Ce)晶体具有较高的相对光输出，表明对于同一能量的射线，LaBr3(Ce)可以产生更多的光子，这类晶体的能量分辨率可以达到 2.6~4.2%(^{137}Cs @662keV)，但其价格昂贵，且本身具有放射性，会干扰辐射测量过程。NaI(Tl)探测器的能量分辨率在 7~9%(^{137}Cs@662keV)，NaI(Tl)闪烁体是伽马射线测量使用范围最广的晶体之一，具有良好的密度特性（3.67g/cm^3）；其生产制备工艺成熟，价格低廉易于获得的同时，具有较高的发光效率（38 光子/keV）[7]；此外，如图 1 和图 3(a)所示，SiPM 的最佳光谱响应波长（430nm）与 NaI(Tl)发光波长(420nm)匹配程度较好，SiPM 的光子探测效率约 30%~40%，其量子效率比 PMT 好[8]，因此采用 SiPM 耦合 NaI(Tl)晶体的探测器可以满足高效探测的设计需求。由于探测器随探测面边长的增加，光子探测效率（Photon detection efficiency，PDE，指一定时间内器件探测到的光子数与入射到器件表面的光子数百分比[8]）增加，能量分辨率更高，又考虑到系统的小型化设计，因此 NaI 晶体尺寸选择边长为 1 英寸的正方体。

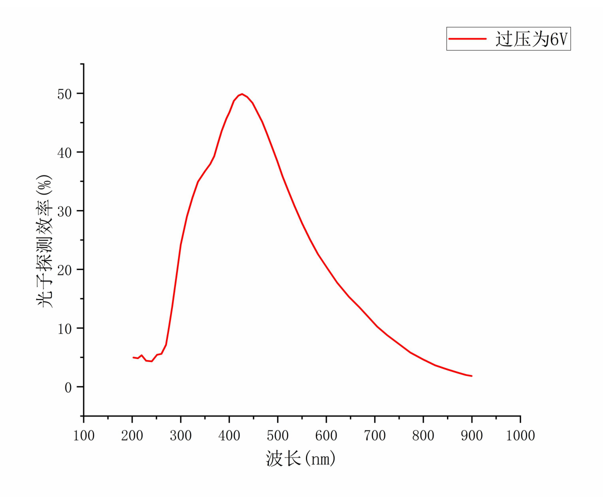


图 1 SiPM 光子探测效率

1.1.2 探测器的蒙特卡罗模型

为了验证设计原理，通过蒙特卡罗(Monte Carlo，MC)模拟方法模拟计算探测器的结构参数，对不同出光面面积在探测面收集到光子数目和能量分辨率进行模拟[9]。图 2 为 NaI 闪烁体与 SiPM 耦合组成的探测器探头部分的示意图。

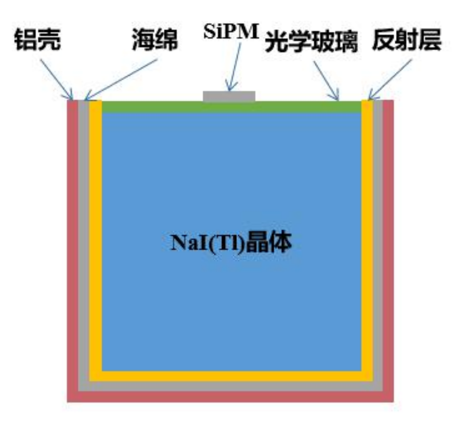
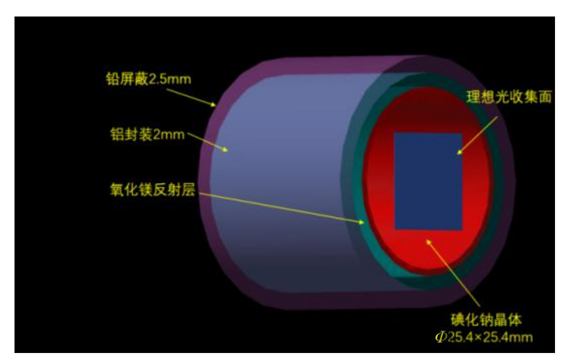
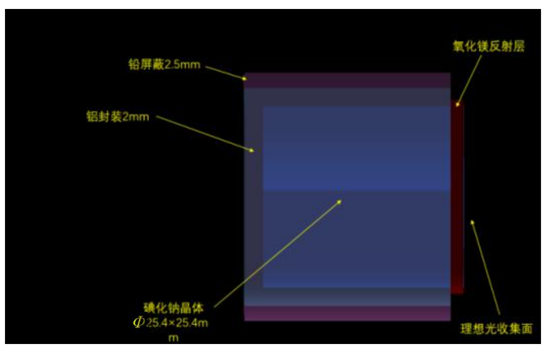


图 2 NaI(Tl)闪烁体耦合 SiPM 示意图



(a)底面 45 度侧透图



(b)侧面图

图 3 碘化钠的蒙特卡罗模型

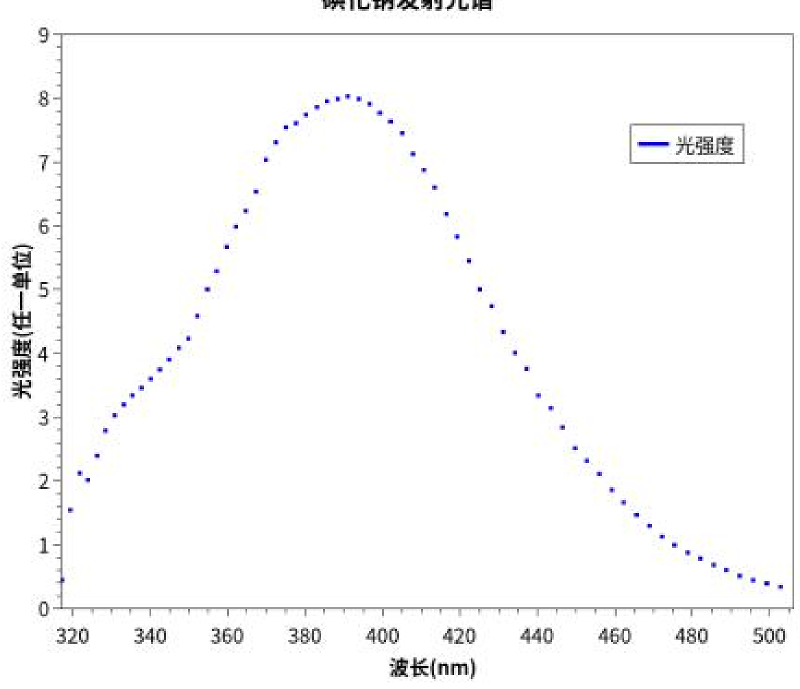
如图 3 所示。在 Geant4 中对碘化钠探测器进行建模，碘化钠探测系统主要由铅层、铝层、碘化钠晶体、玻璃光导和探测面组成。这些部件中，铅层用于屏蔽外部本底射线；碘化钠晶体用于吸收γ射线并将射线转化为闪烁光子；氧化镁反射层用于收集和反射闪烁光子；玻璃光导位于晶体和探测面的中间，连接晶体和探测器，减少空气全反射并使闪烁光子在探测面被收集；探侧面吸收闪烁光子，根据闪烁光子的波长对应的量子效率计算光电子数，并由 Geant4 程序记录。

探测器的实际能量分辨率由式 1[10]表示：

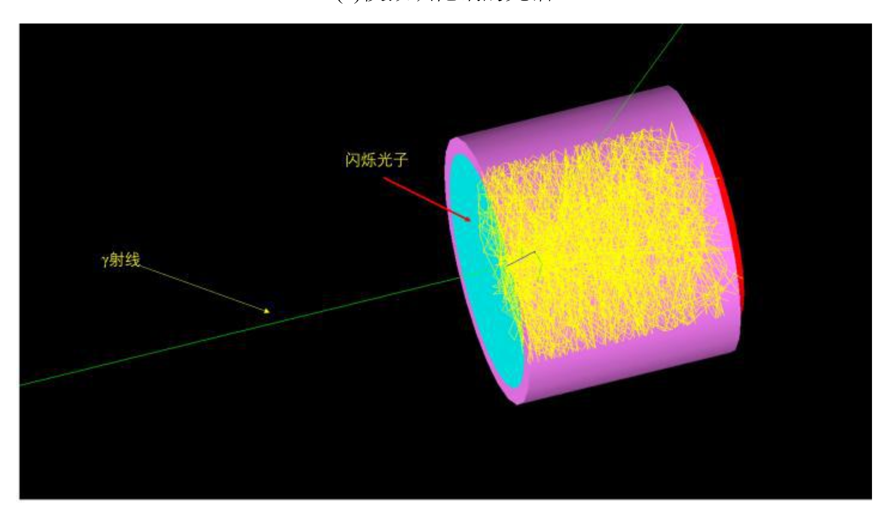
$$R^2=(\delta_{in})^2+(\delta_p)^2+(\delta_{st})^2+(\delta_n)^2 \quad (1)$$

其中δ_{in}为闪烁体自身的分辨率，表示闪烁光发射的统计涨落[10]；δ_p为转移分辨率，表示闪烁光输运过程中对能量分辨率的贡献[10]; δ_{st}为 SiPM 的统计贡献，表示探测吸收闪烁光过程中的统计涨落[10];δ_n为暗噪声的贡献[10]。模型中对闪烁光子在碘化钠探测器中的输运过程进行了模拟，但简化后的理想光收集面不具备模拟电子学器件特性的能力，如暗噪声。因此本研究模型模拟探测器的能量分辨率可经过式 1 简化后得到式 2。

$$R^2 = (\delta_{in})^2 + (\delta_p)^2 \quad (2)$$



(a)模拟碘化钠的光谱

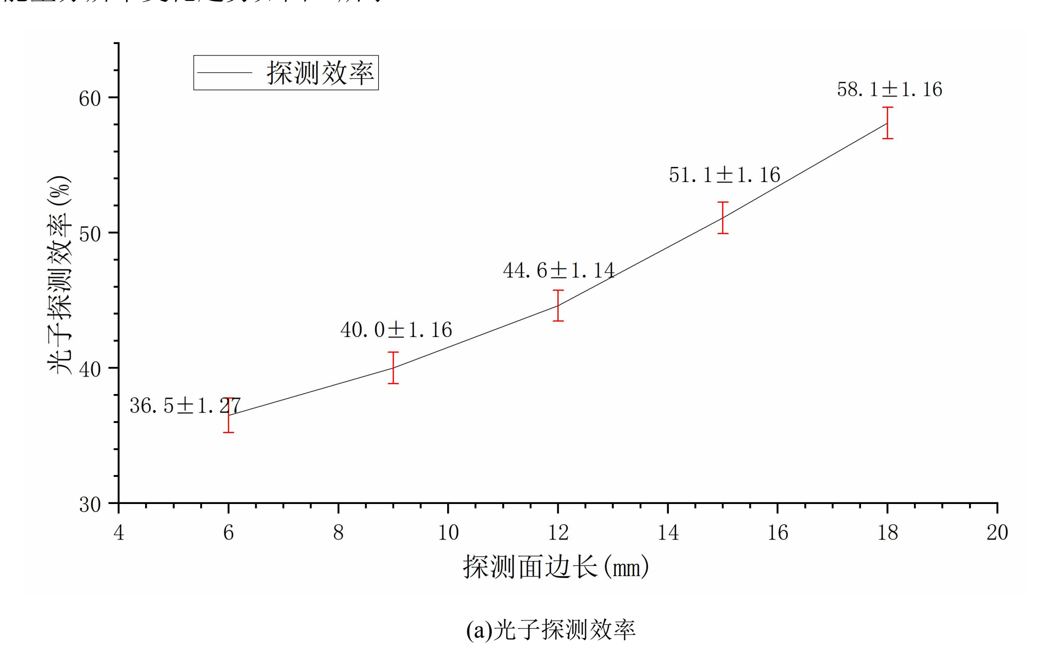


(b)闪烁光输运路径

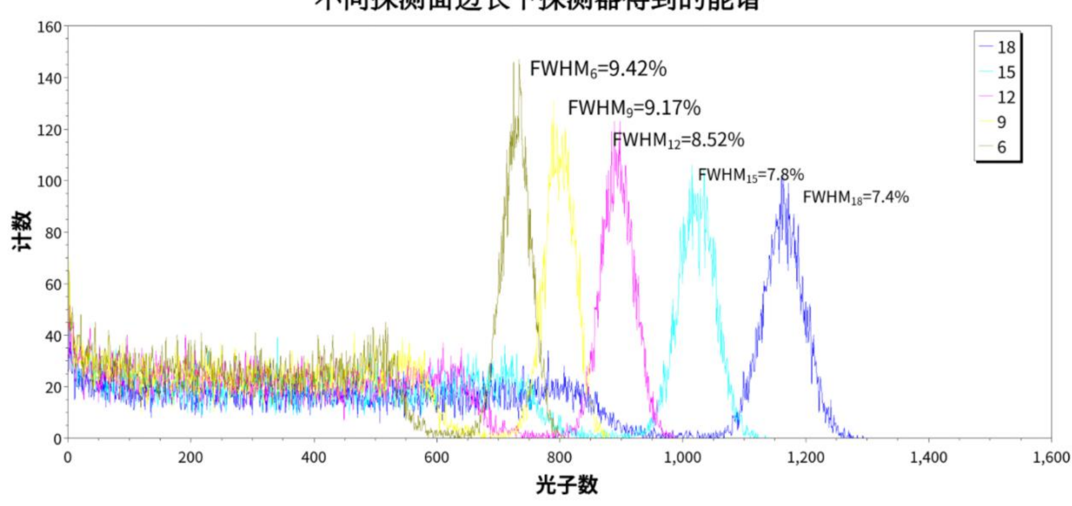
图 4 模拟中晶体发光情况

在碘化钠探测器模型中加入光子，可得到闪烁光子的对应发射光谱和输运过程，图 4(a)为碘化钠模拟发射光谱图，4(b)为探测器模型中闪烁光子的输运途径示意图，绿色为γ射线，黄色为闪烁光子。因此本模型可以对闪烁光的统计涨落过程δ_{in}进行准确模拟；模型中氧化镁反射层和玻璃光导可对闪烁光子进行反射和折射，因此可以对光子在探测器内部的输运过程δ_P进行准确模拟。由于蒙特卡罗模拟程序无法模拟电子学过程，因此本模型

无法模拟δ_n过程，但模型可以对探测器的能量分辨率进行一定程度的预测。由于 SiPM 的外型为规则立方体，因此在不使用异形光锥的情况下可使 SiPM 完全落在晶体底面内，本文选用的 1 英寸碘化钠晶体可耦合边长最大约为 18mm 的器件，以 18mm 为最大值，3mm 为梯度建立不同尺寸的光收集面的模型，得到不同探测面边长下探测器的能量分辨率。结果显示当探测面截面为正方形时，随着探测面边长增加，探测面对于闪烁光子的探测效率[8]和能量分辨率变化趋势如图 5 所示。



(a)光子探测效率



(b)光子能量分辨率

图 5 不同边长下的探测器的性能

由图 5(a)和 5(b)可知，随着探测面边长的增加，光子探测效率增加，能量分辨率越好。因为探测面积的增加，不仅可以吸收更多的闪烁光子，提高了测量中的光子探测效率，而且到达出射面附近的光子更可能被探测吸收而不是被折射或反射，因此降低了闪烁光子输运过

程中的统计涨落，使能量分辨率提高。为使探测器的能量分辨率达到最佳，同时又兼顾小型化设计的需要，经过多次模拟得到的碘化钠探测器详细参数如表 2 所示。

表 2 碘化钠探测器模拟参数

部件	尺寸(mm)	材料	密度(g/cm3)
铅壳	外壁 Φ 30.9×25.4 内壁 Φ 28.4×25.4	Pb	11.35
铝壳	外壁Φ 28.4×25.4 内壁 Φ 26.4×25.4	Al	2.7
氧化镁反射层	外壁Φ 26.4×25.4 内壁 Φ 25.4×25.4	MgO	3.58
碘化钠晶体	Φ 25.4×25.4	NaI(Tl)	3.67
光导	Φ 25.4×2.0	SiO2	2.21
探测面	$6\times6-18\times18$	理想光收集面	/

1.1.3 SiPM 选型

SiPM 作为一种高分辨率、低噪声、高增益的光敏器件，常用于探测低光强信号或单光子事件，其内部集成了许多(几千到几万)个雪崩二极管(Avalanche Photodiode,APD)和淬灭电阻[6]，称为像素单元，这些单元通常呈阵列状排列，紧密相邻，构成一个大的光敏面积。每个单元是工作在盖革模式下的光电二极管[6]，当一个光子击中 SiPM 的光敏面时，每个像素单元的雪崩二极管上便会产生一个雪崩电流，每个雪崩电流累加之后形成输出信号，其幅度正比于产生雪崩的二极管个数，即正比于吸收的光子数（光子计数器），这种增益机制使 SiPM 能够检测到弱光信号并提供高信噪比[9]。SiPM 的分辨率取决于多个因素，包括像素单元的尺寸、数量、增益、电子噪声等。较小的单元尺寸通常提供更好的空间分辨率，而较多的单元和较高的增益可以提供更好的能量分辨率[8]。为得到最佳的探测效率及能量分辨率需保证晶体发射的光子尽可能多的被 SiPM 收集，减少光子从出光面泄露，因此 NaI 晶体出光面尺寸需与 SiPM 感光面尺寸基本相同。市面上的主流商用 SiPM 由于其内部结构和生产制造工艺的差异导致 SiPM 的偏置电压差异较大,为满足开发需求，降低设计成本和难度，本文拟采用森美(ONSEMI)公司的型号为 MicroFJ-60035-TSV 的 SiPM 作为探测器的光电转换器件，其偏置电压在 25.2V-30.7V 范围内，具有高光子探测效率和定时分辨率传感器的特性，每片感光面积为 6mm×6mm,像素间距 35μm，含 22292 个像素，工作温度范围-45℃~85℃，封装尺寸为 7mm×7mm，为了提高灵敏度，满足该探测器的设计需求，采用 4 片 SiPM，感光总面积为 12mm×12mm，组成 2×2 的 SiPM 阵列作为探测器的光电转换器件。

1.2 探测器硬件设计

1.2.1 探头封装设计

为了提升探测效率，排除闪烁体与 SiPM 之间的空气，闪烁体与 SiPM 之间采用光学耦合剂耦合。选用 ELJEN Techonology 公司生产的专用耦合剂，型号为 EJ-560，其具体参数如表 3 所示，这款耦合剂对 NaI(Tl)晶体发射的对应波长范围内的光具有高透明度的特性[11]，如图 6 所示。

表 3EJ-560 型号光导的具体参数

材料特性	密度（g/cm^3）	邵氏 A 硬度	折射率	工作温度（℃）
数值	1.03	16-24	1.43	-40 至 70

图 6 硅橡胶光导对各波长入射光的透明程度

由于 NaI(Tl)晶体易潮解，虽然出厂时已有防潮处理，但晶体加工存在误差，需进一步进行防潮设计；此外为避免外部光源进入探头对原始信号产生干扰，探头需完全避光，通过在探测器晶体外壳上安装顶盖及橡胶垫片，实现避光防潮。

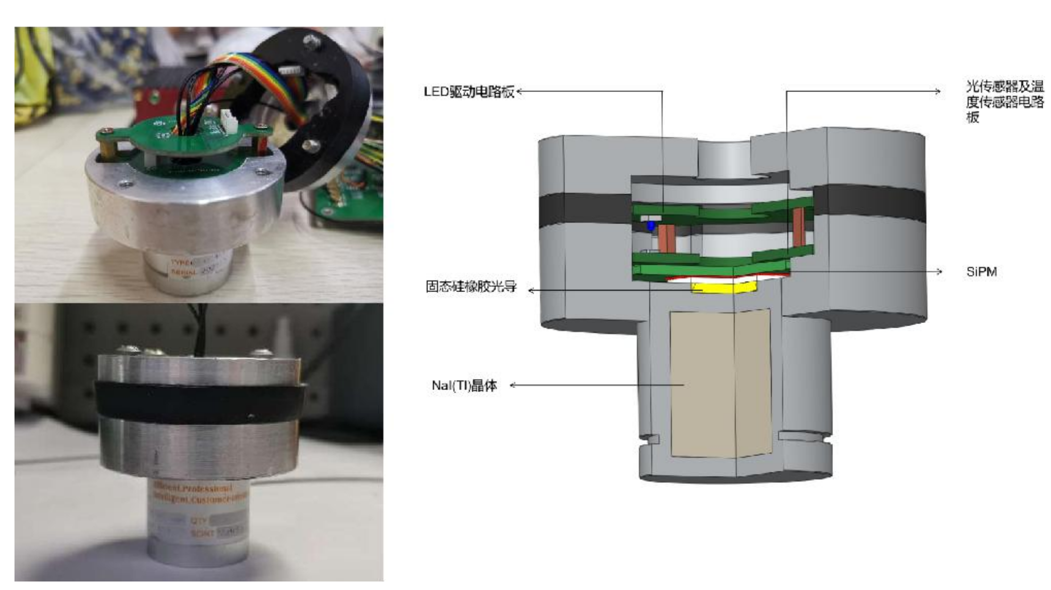


图 7 探头实物与建模对比

1.2.2 信号读出及调理电路

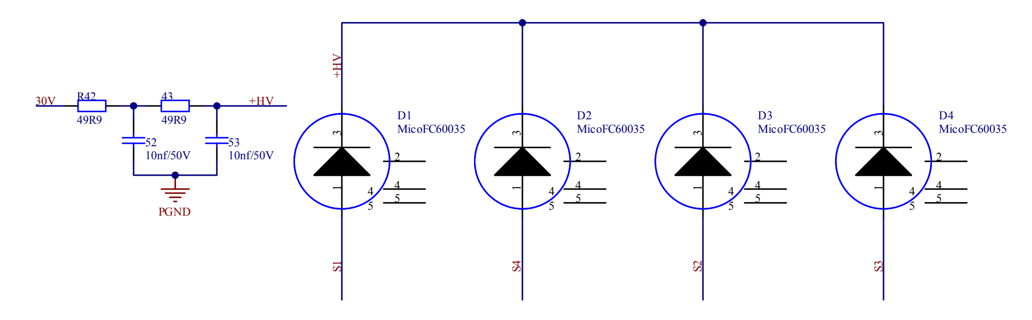


图 8 SiPM 信号读出电路

如图 8 所示为探测器信号读出电路。在 SiPM 的阴极施加 29.5V 偏置高压，R42、R43、C52、C53 起滤波去耦的作用。

为了使探测器读出的脉冲信号更加清晰直观，采用低噪声运算放大器 ADA4625 对四个 SiPM 的输出信号 S1、S2、S3、S4 进行求和放大，如图 9 所示。ADA4625 是一款低噪声双电源运算放大器，较大的差分输入电压不会引起大的输入电流，标准工况下提供 18MHz 增益带宽，低噪声 JFET 输入[12]和 600 Ω 负载的驱动能力[13]。SiPM 输出的 4 路信号为正脉冲信号，经过反相求和后，变为为单路负脉冲信号输入至第二级放大电路，输出脉冲幅度为各 SiPM 输出脉冲幅度之和。

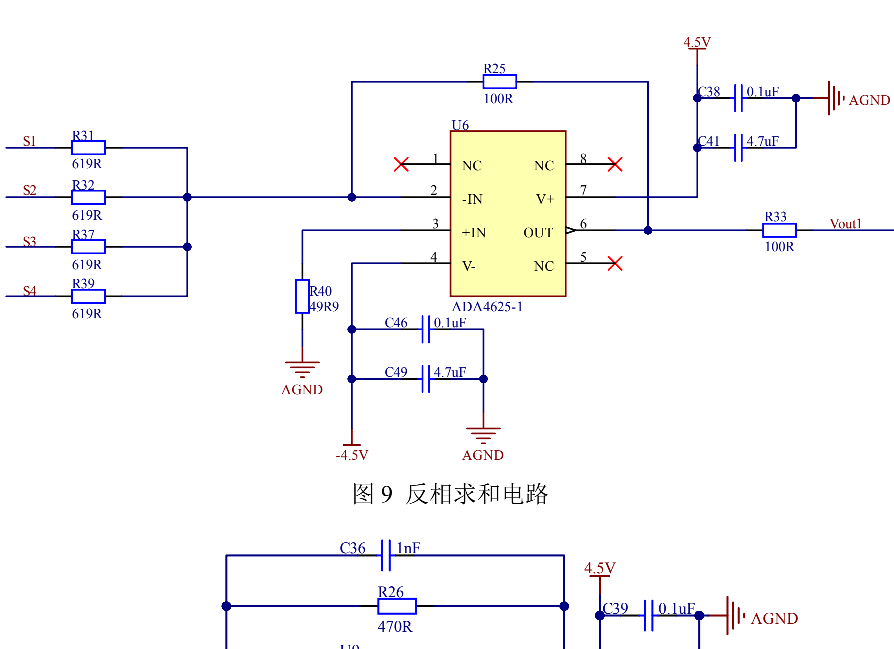


图 9 反相求和电路

图 10 放大电路

由于数字多道中 ADC 的输入电压范围在 0~2V，采用 ADA4625 对前级求和信号二次反向放大，极性变为正脉冲信号，电路如图 10 所示，C36 作为相位补偿电容，输出信号与输入的关系可由下式 1 得到：

$$V_o - V_i = \frac{1}{C}\int i_i dt = \frac{1}{C}\int \frac{V_I}{R} dt \quad (1)$$
$$V_o = -\frac{1}{RC}\int V_i dt$$

为避免运放进入饱和状态，通过 R22 并联 C36 为充电后的电容提供直流通路共同构成负反馈环回路[14]。运放输出脉冲幅度受到电源轨限制，通过配合程控增益电路将信号放大到合适的幅值（0~2V）进入 ADC。运放的正负电源输入端滤波电容，滤除电源噪声。

1.2.3 电源模块设计

电源模块包括为运放供电的±4.5V 电源和 SiPM 供电的+29.5V 偏置高压电源。

+4.5V 电源采用具有低噪声(3.8μV)的低压差线性稳压器(Low Dropout Regulator，LDO)TPS7A870，输入电压 1.4~6.5V，输出电压 0.8-5.2V，输出电流 500mA。+4.5V 电源采用反相稳压芯片 LM27761，提供高达 250mA 的输出电流，运放的静态功耗只有几十毫安，可满足运放的功耗需求。

探测器系统采用 Sensl 公司的型号为 Micro-FC-60035 的 SiPM 作为光电转换器件，偏置电压在 26~30V 之间，偏压大小影响 SiPM 的倍增过程，偏压升高，SiPM 的灵敏度越高，增益越大[8]。如图 11 所示，+29.5V 电源采用凌特公司生产的 LT8410 升压转换器，LT8410 采用可变峰值电流和可变关断时间控制方案，并以高开关频率为负载提供高低纹波电压输出[15]。

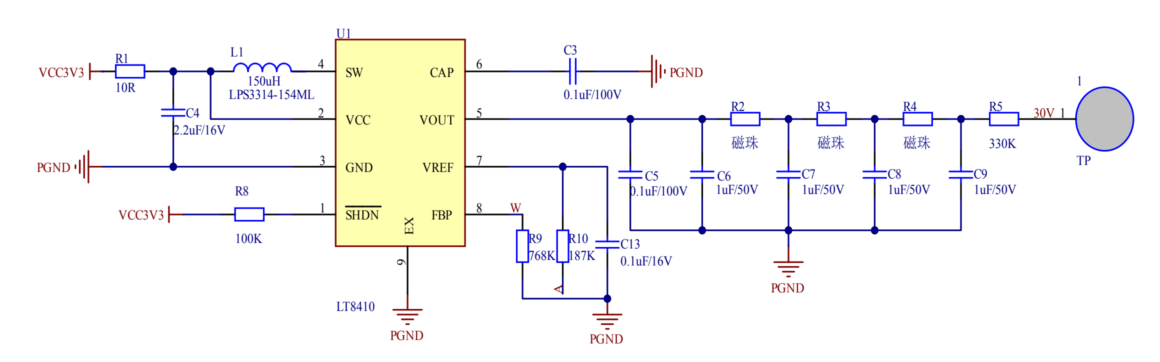


图 11 SiPM 反向偏置高压输出电路

为实现探测系统增益可控，以实现对不同射线的探测，通过两种方式进行增益调节。

1）调节 SiPM 偏置高压

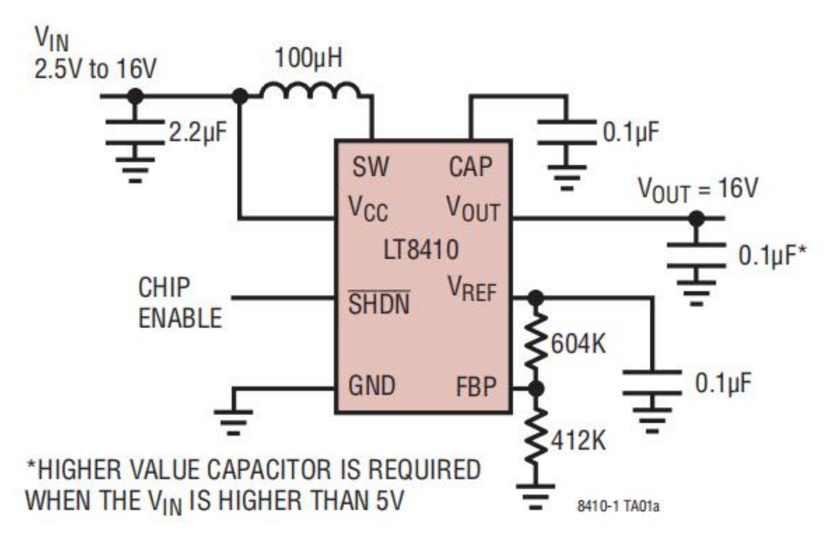


图 12 LT8410 电压配置示意图

如图 12 所示，LT8410 为 SiPM 提供偏置电压，其中 V_{REF} 引脚提供了精确的 1.235V 参考电压，V_{FBP} 值的大小可由外接电阻调整，输出电压可通过式 4 表示：

$$V_{out} = 31.85 \times V_{FBP} \quad (4)$$

2）程控增益

通过 DAC 器件 AD5543 调节系统中运算放大器的放大倍数。图 13 为上位机中调整增益的窗口，通过下发指令对增益进行配置。

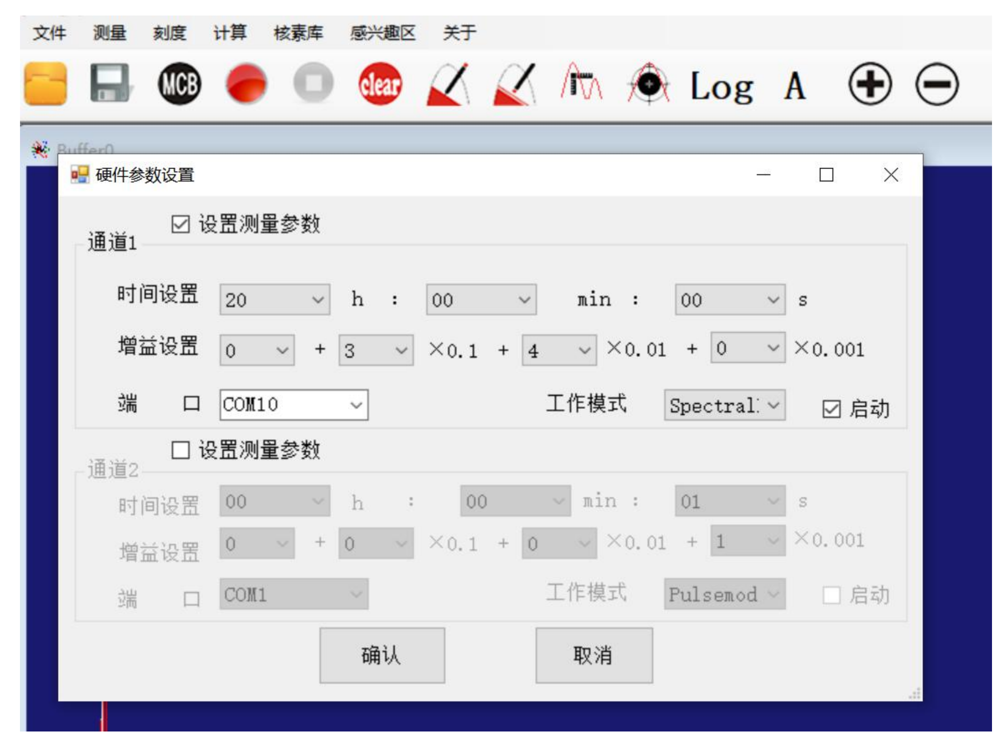


图 13 能谱测量软件增益调节界面

如图 14 所示，16 位 D/A 转换器 AD5543 与运算放大器 ADA4817 组成增益控制电路，将 AD5543 的输出端与地分别连接到运放的反、同相输入端，DAC 最大输出电流由 VREF

引脚上所连接的参考电压决定。通过 SPI 协议向 AD5543 写入不同值，内部电桥会通过断开或闭合使电路桥两端阻值发生变化，进而改变运放的反馈电阻大小，实现调节放大倍数的目的[16]。

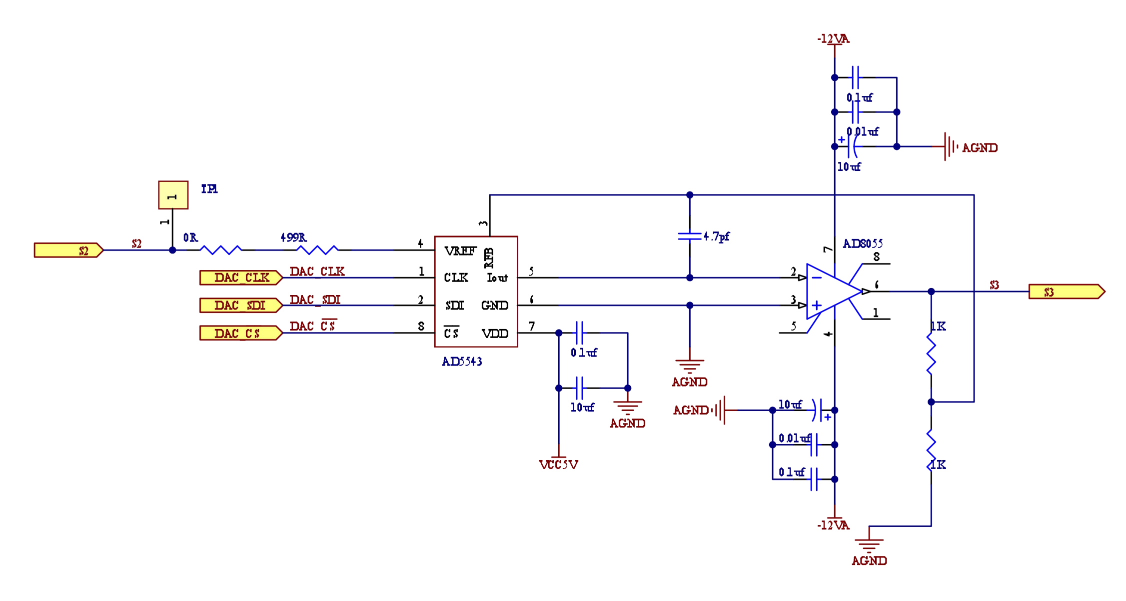


图 14 程控增益电路

2 系统分析

2.1 信号测试

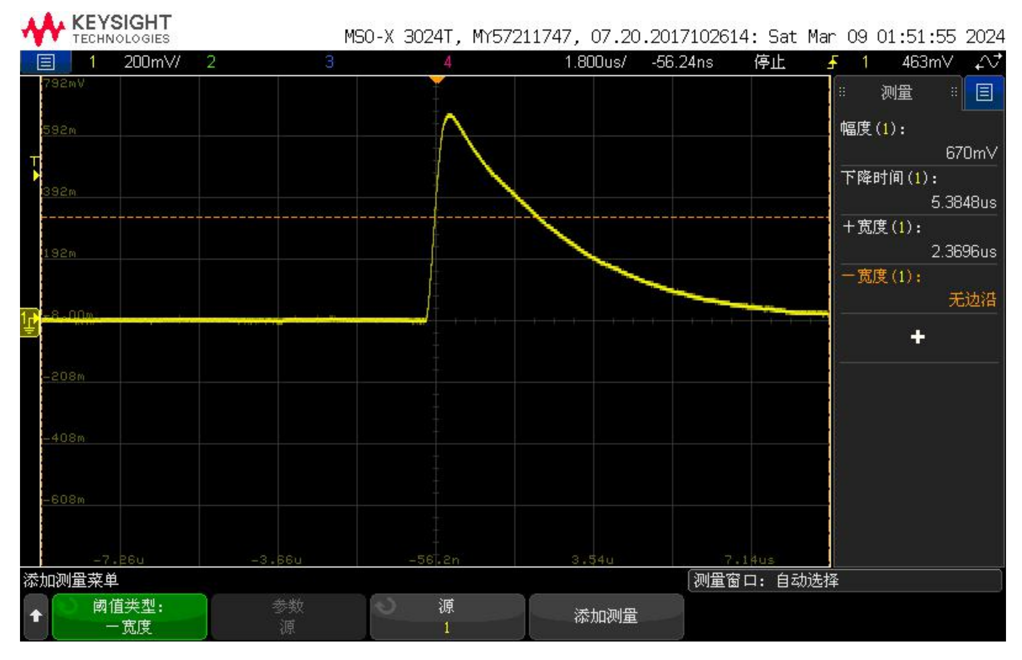


图 15 探测器前放电路板输出信号

在室温条件下，探测器附近放置一个活度为 140Bq 的 ^{137}Cs 点源，测得的前放电路输出的正脉冲信号如图 15 所示，幅值在 670mV 左右，半高处脉冲宽度约为 2.37μs，信噪比约

为 29.20dB,该信号可被 ADC 无失真转换采集。

2.2 电源性能测试

电源的性能一般通过输出电压值和纹波峰-峰值两个参数反映。在室温常压下，输出电压采用 4 位半的万用表(福禄克 15B)测量，电源纹波采用 2GSa/s 带宽的示波器(Agilent DSO-X2012A)探针接接地环进行测量，测得输出直流电压和纹波的峰-峰值如表 4 所示。

表 4 电源性能测试

输出电压值（V）	纹波峰-峰值（mV）	纹波系数（%）
+4.49	2.3	0.051
-4.46	2.6	0.058
+29.50	3.3	0.011

从表中数据可得，输出直流电压值稳定，噪声均在 5mV 以内。

2.3 能量分辨率分析

能谱仪的能量分辨率 R 常用谱线峰的半高宽表示[17]，在 1.2 中提到影响探测器能量分辨率的因素主要包括以下 4 种：

①放射源本身的能量分辨率；②NaI(Tl)晶体的能量分辨率，射线在晶体内损失能量打出荧光光子的过程具有统计涨落特性，这是影响晶体能量分辨率的重要因素，可通过提高晶体的发光效率或者使用更大体积的晶体来实现；③SiPM 对入射光子的光电转换及倍增过程受环境温度、偏置电压、暗噪声以及相邻最小像素单元串扰等因素的影响；④电子学系统影响。

因此闪烁体伽马能谱仪的能量分辨率可用式 5 表示如下：

$$R=\sqrt{R_{源}^2+R_{NaI(Tl)}^2+R_{SiPM}^2+R_{电子学}^2} \quad (5)$$

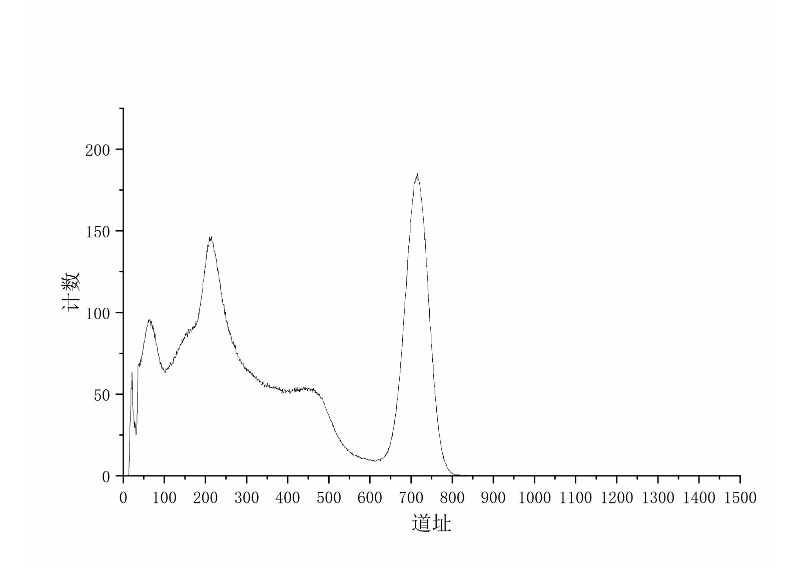


图 16 室温下 本实验探测器 5 分钟获取的 ^{137}Cs 点源能谱

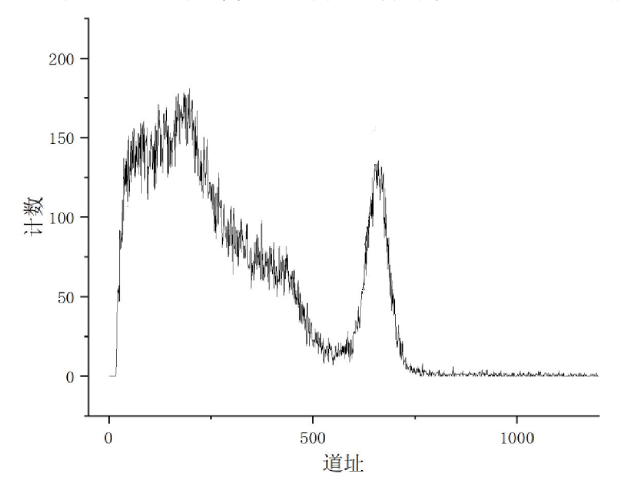


图 17 室温下 滨松光子 CH249-02 碘化钠探测器 5 分钟获取的 ^{137}Cs 点源能谱

图 16 为室温条件下，探测器受 ^{137}Cs 源连续照射 5 分钟后所得能谱情况：此时 ^{137}Cs 全能峰峰位在 715 道附近，探测器对 662keV 大小的射线能量分辨率约为 8.72%，测得的能谱本底与高能部分表现良好，高能部分计数低，本底谱线干净，但由于测试环境和测试方法的影响，探测器的能量分辨率会受到影响而变差，其影响因素主要包括：

（1）对于单晶 NaI（Tl）γ 谱仪来说，能量分辨率是以 ^{137}Cs 的 0.662MeV 单能γ射线的光电峰为标准的，一般值在 7-15%，源的不同是影响探测器能量分辨率的一小部分因素

（2）NaI(Tl)闪烁体的影响，铊（Tl）的掺杂浓度对 NaI(Tl)的性能和能量分辨率有重要影响。不同的掺杂浓度可能导致不同的光产额和时间响应，进而影响能量分辨率。

（3）SiPM 的相关噪声，相关噪声是指由先前的光子或暗事件触发的次级雪崩放电的输出，主要分为后脉冲和光学串扰事件。后脉冲主要是 APD 在雪崩倍增过程中被困在硅中的载流子在 APD 的恢复阶段被放电，会发生后脉冲。载波最终会产生一个幅度小于原始次级电流的新次级电流脉冲。光学串扰主要是由于一个像素单元中的一次雪崩触发相邻单元中的第二次雪崩所引发的的最佳串扰（Optimal Crosstalk，OC）。而且光学串扰会随着偏置电压的增加而增加。

（4）电子学引入的噪声，前放电路和信号调理电路中运算放大器等有源器件的噪声和电阻、电容、电感等无源器件会引入的噪声，造成探测器的能量分辨率变差，这些噪声主要是包括：①热噪声，电子元器件中的温度引起的随机电子运动而产生的噪声；②分布参数线路噪声，在印刷线路板(Printed Circuit Board，PCB)等分布参数线路中，由于电磁干扰和信号传播的散射，会引入信号噪声；③ADC 的量化误差引入的噪声；④电源噪声，电源中的

电压和电流波动引入的噪声。

为使了实验效果明显，本实验通过与滨松光子型号为 CH249-02 的碘化钠探测器的能谱进行对比，滨松光子碘化钠探测器晶体尺寸为直径 2 英寸高 3 英寸的圆柱体，采用 R1924A 的光电倍增管，脉冲输出幅度在 0.6V 左右，采用 12V 供电，在同一温度环境下接入与实验相同的探测系统，得到能谱图如图 17 所示，^{137}Cs 全能峰峰位在 652 道附近，探测器对 662keV 大小的射线能量分辨率约为 8.82%。由此可得，本实验采用 1 英寸的 NaI 晶体和 SiPM 光电转换器件设计的探测器实现了小型化设计，同时对射线有较好的能量分辨率。

3 结论

针对小型化 SiPM-NaI(Tl)探测器，本文首先在 GEANT4 平台建立放射源的物理模型和基于闪烁光传输的 NaI 探测器系统，通过对不同出光面面积在探测面收集到光子数目和能量分辨率进行理论模拟，确定 NaI 晶体的最佳尺寸。然后设计调试信号读出电路，通过数字多道测得 ^{137}Cs 点源的能谱，并与滨松光子公司 NaI 闪烁体探测器所测能谱进行比较，结果显示本文设计的 SiPM-NaI(Tl)探测器对 ^{137}Cs(@662keV)射线能量分辨率为 8.72%，表明本实验设计的探测器在保证了较好的能量分辨率的同时，又实现了小型化探测器的设计目的。但由于 SiPM 和模拟电路受温度影响影响较大，这会造成能谱漂移[18]并影响能谱的能量分辨率，因此本文还存在不足，后续将对 SiPM 信号读出系统的温度效应进行研究，并对其进行温度补偿[19]。

参考文献

[1] WANG Qingguo, Liu Jianli, Zhang Yueli. Application of ground penetrating radar and gamma-ray spectroscopy in detecting petroleum hydrocarbon pollution [J]. Shaanxi Geology,2022,40(02):98-103. (in Chinese)

(王庆国,刘建利,张岳礼.探地雷达和伽玛能谱测量在探测石油烃类污染中的应用[J].陕西地质,2022,40(02):98-103.)

[2] Wang Jifang, Xu Ran, An Maoguo. Application of terrestrial gamma spectrometry in rare earth exploration: A case study of Longbaoshan rare earth deposit in Lanling County, Shandong Province [J]. Shandong Land and Resources, 2019,37(03):54-60. (in Chinese)

(王继芳,徐然,安茂国.地面伽玛能谱测量在稀土矿勘查中的应用——以山东省兰陵县龙宝山稀土矿为例[J].山东国土资源,2021,37(03):54-60.)

[3] Yang Jie. Gamma dose estimation for complex terrain scenarios in nuclear emergency response [D]. Tsinghua University,2016. (in Chinese)

(杨洁. 核应急中复杂地形场景伽马剂量估算[D].清华大学,2016.)

[4] Zhai Juan, Lai Wanchang, Yin Chuou. Gamma energy spectrum measurement of NaI (Tl) detector performance test [J]. Journal of electronics, 2017 (14) : 17-18. DOI: 10.16589 / j.carol carroll nki cn11-3571 / tn. 2017.14.007. (in Chinese)

(翟娟，赖万昌，尹楚欧．伽玛能谱测量中 NaI(Tl) 探测器的性能测试 [J]. 电子制作,2017(14):17-18.DOI:10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2017.14.007.)

[5] Guzainuer·Anniwa, Aierken·Abuliemu, Puerkaiti·Xiaerding. Effect of crystal volume on main performance of NaI(TI) detector [J].

Nuclear Electronics and Detection Technology,2016,36(11):1089-1093. (in Chinese)

(古再奴尔・安尼瓦,艾尔肯・阿不列木,甫尔开提・夏尔丁.NaI(Tl)探测器晶体体积对主要性能影响研究[J].核电子学与探测技术,2016,36(11):1089-1093.)

[6] Huang Chen, Lin Shaopeng, Wang Biao. Research on SiPM array as scintillator readout for gamma spectrometer [C]// Chinese Society of Electronics, Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology Branch of Chinese Nuclear Society. Proceedings of the 18th National Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology Annual Conference.[Publisher unknown],2016:8. (in Chinese)

(黄土琛,林少鹏,王彪. SiPM 阵列作为闪烁体读出用于伽马谱仪的研究[C]//中国电子学会,中国核学会核电子学与核探测技术分会.第十八届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集.[出版者不详],2016:8.)

[7] Yuan Hang, Shan Wei, Zhao Mengwei. Reflector of NaI (Tl) scintillator detector efficiency [J]. The influence of the event horizon of science and technology, 2021 (10) : 90-92. The DOI: 10.19694 / j.carol carroll nki issn2095-2457.2021.10.28. (in Chinese)

(袁航,单伟,赵梦薇.反射层对 NaI(Tl) 闪烁体探测器探测效率的影响[J].科技视界,2021(10):90-92.DOI:10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2021.10.28.)

[8] Liu Jiasong, CAI Hongzhi. Detailed description of the performance parameters of silicon photomultiplier tube.[EB/OL][2023-09-08].http://share.hamamatsu.com.cn/specialDetail/2018.html. (in Chinese)

(刘佳松,蔡红志.硅光电倍增管(MPPC/SiPM)性能参数详解.[EB/OL][2023-09-08].http://share.hamamatsu.com.cn/specialDetail/2018.html)

[9] Peng Kuntao, Yang Yuchao, ZHONG Haowei et al. Monka simulation of NaI(Tl) detector performance [J]. Energy Research and Management,2023,15(01):184-190.DOI:10.16056/ J.2096-7705.2023.01.027. (in Chinese)

(彭坤涛,杨羽超,钟浩威等.NaI(Tl)探测器工作性能的蒙卡模拟[J].能源研究与管理,2023,15(01):184-190.DOI:10.16056/j.2096-7705.2023.01.027.)

[10] MA Xiaoyu, FAN Zhihua, Yang Qilong et al. Array photon counter based on multi-anode photomultiplier tube [J]. Chinese Journal of Quantum Optics,2019,25(01):87-93. (in Chinese)

马晓燠,樊志华,杨奇龙等.基于多阳极光电倍增管的阵列型光子计数器[J].量子光学学报,2019,25(01):87-93.

[11] M. Moszyriski,L. Swiderski,T. Szczesniak,A. Study of LaBr<formula formulatype="inline"><tex>$_2008$</tex></formula> Crystals Coupled to Photomultipliers and Avalanche Photodiodes[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science,2008,55(3).

[12] ZHANG Mingmin, Wang Chenghe, Yang Yang et al. A high-performance jfets input operational amplifiers [J]. Journal of semiconductor technology, the lancet 2018 (02) : 115-119 + 135. DOI: 10.13290 / j.carol carroll nki BDTJS. 2018.02.005. (in Chinese)

(张明敏,王成鹤,杨阳等.一款高性能 JFET 输入运算放大器[J].半导体技术,2018,43(02):115-119+135.DOI:10.13290/j.cnki.bdtjs.2018.02.005.)

[13] Anolog Device Inc.2017.ADA4625.Low Noise,Fast settling single supply,PRO,JFET Op Amp[EB/OL].https://www.analog.com/media/cn/technical-documentation/data-sheets/ADA4625-1

[14] XU Xiaoguang, Huang Honghong, ZHAO Ziyi. Stability analysis and correction method of negative feedback Amplifier Circuit based on Simulation [J]. Journal of Langfang Normal University (Natural Science Edition),2022,22(02):26-30. (in Chinese)

(徐晓光,黄宏宏,赵子逸.基于仿真的负反馈放大电路稳定性分析及矫正方法[J].廊坊师范学院学报(自然科学版),2022,22(02):26-30.)

[15] Anolog Device Inc.Linear Technology Corporation Inc. 2008.LT8410.Ultralow power Boost Conventer with output Disconnect[EB/OL].https://www.analog.com/cn/products/lt8410.html.

[16] Anolog Device Inc. 2012.AD5543.precision 16bit, low power, current output, small form factor digital-to-analog converters (DACs)[EB/OL].https://www.analog.com/cn/products/ad5543.html#product-overview.

[17] Li Maolin, Xu Wusheng, Zhang Bin, et al. Large size mixing thallium sodium iodide crystal growth and scintillation properties [J]. Journal of artificial crystal sinica, 2023,52 (01) : 17-24. DOI: 10.16553 / j.carol carroll nki issn1000-985 - x., 20221206.001. (in Chinese)

(力茂林,徐悟生,张斌等.大尺寸掺铊碘化钠晶体生长及闪烁性能[J].人工晶体学报,2023,52(01):17-24.DOI:10.16553/j.cnki.issn1000-985x.20221206.001.)

[18] Sun Xiaonan, Sun Tao, Li Jiangkun et al. Aviation gamma measurement stabilizer circuit design [J]. Computer measurement and control, 2022, 30 (10) : 227-232. The DOI: 10.16526 / j.carol carroll nki. 11-4762 / tp. 2022.10.035. (in Chinese)
(孙肖南,孙陶,李江坤等.航空伽玛测量稳谱电路设计[J].计算机测量与控制,2022,30(10):227-232.DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2022.10.035.)

[19] Li Dong, Zhang Xiongjie, Wang Bao, Xia Houmingdong, Ye Yuli, Feng Li. Design of temperature compensation Power supply for Silicon Photomultiplier tube (SiPM) detector [J]. Electronic Technique,2023,52(04):9-11. (in Chinese)
(李东,张雄杰,王鲍,夏侯命栋,叶煜力,冯丽.硅光电倍增管(SiPM)探测器温度补偿电源设计[J].电子技术,2023,52(04):9-11.)

Design of portable NaI(TI) detector based on SiPM

FENG Penglei[1], LU Wei[1],ZOU Kefeng[1], LI HaoXuan[1], CHEN Junqiao[1],CHEN Ren[1],

YANG YUE[1],ZHOU Yingjie[1],WANG Lei[1,2*]

(*1 Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan,*

2 Sichuan University of Light Chemical Engineering, Yibin 644000, Sichuan)

Abstract: NaI(Tl) crystal is a common radiation detector material, because its interaction with the ray produces a weak light signal, so the photomultiplier tube is needed to convert the light signal into an electrical signal for the back-end circuit to process. Silicon photomultiplier tube, as a new photoelectric conversion device, has the advantages of low noise, small size, low power consumption and diamagnetism compared with traditional photomultiplier tube. Therefore, the NaI(Tl) scintillator detector designed by SiPM has the advantages of small size, high efficiency, sensitivity and strong anti-interference. By optimizing the physical structure and signal processing circuit of the detector, the efficient detection of gamma rays is realized. In this paper, a 1-inch NaI(Tl) detector using SiPM is designed and developed, which has the advantages of small size and low background noise. The influence of the detector on the energy spectrum of 137Cs source is tested, and the results show that the detector has a resolution of 8.72% for the γ-ray energy of 0.662MeV.

Keywords: NaI(TI) crystal; SiPM; Gamma rays; High energy resolution;

Received date：yyyy-mm-dd; **Revised date**：yyyy-mm-dd

Foundation item：National Natural Science Foundation of China(41874121)

Corresponding author(option): Wang Lei, E-mail: 231838648@qq.com